

Nadprzewodnictwo, czyli efekt polegający na przepływie prądu elektrycznego bez jakiegokolwiek oporu elektrycznego, to spektakularne zjawisko, którego nie można zrozumieć, operując jedynie pojęciami klasycznymi, gdyż w ramach klasycznych pojęć jest ono niewytłumaczalne. Dopiero odwołanie się do praw mikroświata pozwala w jakiś sposób zbudować model, w ramach którego zjawisko nadprzewodnictwa staje się uchwytne. Całe to zamieszanie jest spowodowane tym, że w naszym klasycznym świecie



Tomasz Sowiński jest fizykiem na Wydziale Biologii i Nauk o Środowisku UKSW i w Instytucie Fizyki PAN. W 2005 roku skończył studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie

fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

Tomasz Sowiński

Niezwykłe przewodnictwo (cz. 2)

prawa fizyki są zupełnie inne niż tam „na dole”, gdzie nie może zajrzeć żaden, nawet najlepszy mikroskop. I choć zjawiska kwantowe zachodzą dla obiektów bardzo małych, to jednak ich skutki mogą mieć znaczenie makroskopowe i w klasycznym świecie mogą być nie do pominięcia. Jak już mówiłem poprzednio, nadprzewodnictwo wbrew pozorom nie jest przecież jakimś subtelnym, ledwo mierzalnym efektem i wcale nie trzeba bardzo dokładnie starać,

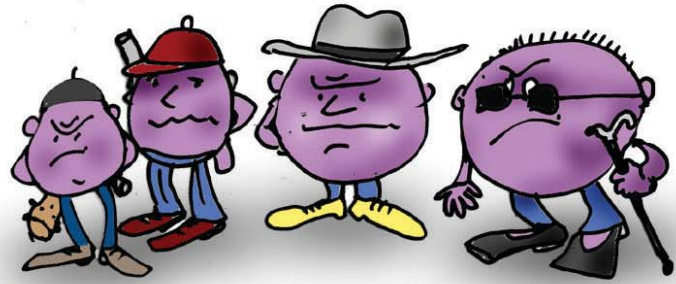
aby je dojrzeć. Jest to zjawisko bardzo dobrze mierzalne w naszym codziennym świecie. Jedyne, czego nadprzewodnictwo potrzebuje do swojego istnienia, to odpowiednio niska temperatura. Jeśli schłodzimy metal odpowiednio mocno, to nawet bardzo prymitywny, klasyczny przyrząd może nadprzewodnictwo bezsprzecznie zarejestrować.

ZWYKŁE PRZEWODNICTWO

Aby dobrze zrozumieć istotę nadprzewodnictwa, trzeba na chwilę wrócić do teoretycznego modelu, który stoi za opisem zwykłego przewodnictwa metali. Opiera się on na dość rozsądnym założeniu, że przewodnictwo w metalach jest możliwe dzięki temu, że atomy tworzące sieć krystaliczną uwspólniają część swoich elektronów. Wygląda to tak, jakby każdy atom, który wchodzi w skład danego kawałka metalu, oddawał jeden (a czasami kilka) swoich elektronów. Elektrony te stają się w pewien sposób niezależne od atomów i poza momentami, w których zderzają się z dodatnio naładowanymi jonami tworzącymi sieć, mogą się przemieszczać praktycznie swobodnie. Bardzo często mówi się, że elektrony te tworzą coś w rodzaju gazu elektronowego. Nazwa ta, choć może wydawać się dziwna, jest bardzo adekwatna, bo w zachowaniu się swobodnych elektronów w przewodniku jest bardzo dużo podobieństwa do zachowania się zwykłych gazów. Na przykład w sytuacji statycznej wypełniają one równomiernie całą dostępną im objętość metalu – dokładnie tak jak gaz znajdujący się w zamkniętym pojemniku.

Fundamentalną własnością elektronów, które tworzą gaz elektronowy, jest ich duża niezależność. W dobrym przybliżeniu można powiedzieć, że każdy elektron porusza się jakby niezależnie od pozostałych. Co prawda oddziałują one ze sobą elektrostatycznie,





Dwie rozłączne rodziny: bozony i fermiony

ale w praktyce dzieje się to tylko na małych odległościach i bardzo, bardzo rzadko. W rezultacie elektrony, które są odległe od siebie, praktycznie nic o sobie nie wiedzą. Często mówi się, że jest to prawie doskonały gaz elektronowy – odpowiednik klasycznego gazu doskonałego, który bardzo dobrze znamy z lekcji fizyki w szkole. To co ma największy wpływ na zachowanie się elektronów w modelu opisującym standardowe przewodnictwo to nieustannie drgające jony tworzące węzły sieci krystalicznej. Elektrony przemieszczające się wzdłuż przewodnika są wciąż rozpraszane przez te drgania i ich ruch jest utrudniony. Jak już mówiłem poprzednim razem, właśnie to rozpraszanie jest główną przyczyną istnienia oporu elektrycznego.

nazwisk jej twórców – amerykańskich fizyków: Johna Bardeena, Leona Coopera i Roberta Shrieffera. Warto może w tym miejscu wspomnieć, że pierwszy z nich, John Bardeen, Nagrodę Nobla otrzymał już w roku 1956 wraz z Schockleyem i Brattainem za wynalezienie tranzystora.

BOZONY I FERMIONY

Kluczowym elementem teorii BCS jest teoretyczna dywagacja, spostrzeżenie, którego dokonał Leon Cooper. Aby zrozumieć to genialne spostrzeżenie, jakiego dokonał Cooper, muszę na chwilę wrócić do dość starej historii (MT 03/2009), w której starałem się przekonać, że wszystkie znane nam cząstki materii można podzielić na dwie rozłączne rodziny: bozony i fermiony.

Fermionami są np. elektrony, ale również protony i neutrony. Fermionami są również dość ostatnio modne tzw. neutrina.

Najlepiej znanymi natomiast bozonami są fotony, ale należą do nich również niektóre atomy. Wynika to z dość ciekawej własności fermionów (z których składa się każdy atom). Otóż fermiony czasami mogą być jakby połówkami bozonów, tzn. ich połączenia w parzyste wielokrotności mają własności bozonów. Dlatego właśnie wśród atomów różnych pierwiastków, które składają się z protonów, neutronów i elektronów (czyli tylko z fermionów), można znaleźć zarówno bozony, jak i fermiony. Na przykład neutralny atom wodoru jest bozonem, bo składa się z jednego protonu i jednego elektronu, zatem z jednej pary fermionów. Z atomem litu może być natomiast różnie w zależności od tego, z którym izotopem mamy do czynienia. Atom 6Li (zawiera trzy neutrony, trzy protony i trzy elektrony) jest fermionem, a 7Li (zawiera cztery neutrony, trzy protony i trzy elektrony) jest bozonem. Krótko mówiąc atomy, które mają parzystą liczbę neutronów w jądrze, są bozonami, a te, które mają ich nieparzystą liczbę, są fermionami (oczywiście pod warunkiem, że są to atomy obojętne, a nie zjonizowane).

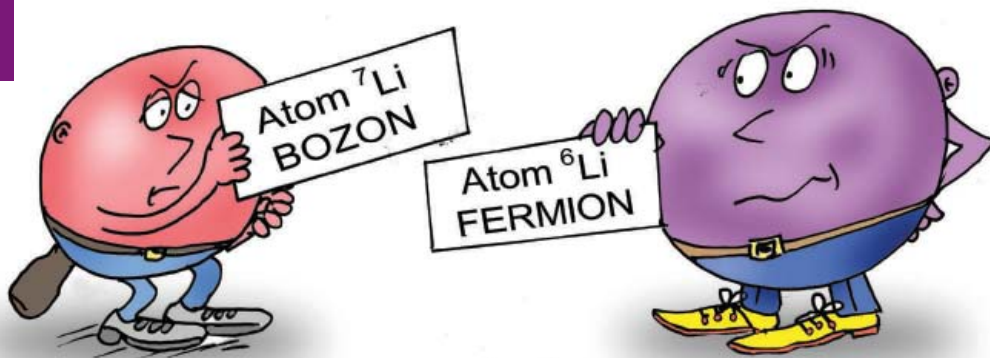
To co jest najciekawsze w całej tej gmatwaniu nie to fakt, że w niskich temperaturach bozony i fermiony zupełnie inaczej się zachowują. Jest tak dlatego, że fermiony są ograniczone przez dobrze nam znany ze szkoły ZAKAZ PAULIEGO. Mówi on, że żadne dwa fermiony nie mogą się nigdy znajdować w tym samym stanie kwantowym. Na przykład elektrony w atomach nie znajdują się wszystkie na najniższej dozwolonej orbicie, ale zajmują je kolejno. Gdyby były bozonami, to zakaz Pauliego nie obowiązywałby ich i dowolna ich liczba mogłaby się znajdować na każdej z orbit.



Prawie doskonały gaz elektronowy

NADPRZEWODNICTWO

Mikroskopowa natura nadprzewodnictwa jest zupełnie inna i była nieznaną przez wiele lat. Wyjaśniła ją dopiero w roku 1957 tzw. teoria BCS, która w roku 1972 została nagrodzona Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki. Przypomnijmy, że samo nadprzewodnictwo zostało odkryte już w roku 1911 przez Onnesa. Skrót BCS pochodzi od pierwszych liter



Atomy obojętne

Opisany powyżej sposób obsadzania stanów kwantowych przez bozony i fermiony ma kluczowe znaczenie, gdy obniżamy temperaturę gazu złożonego z bozonów lub fermionów (czyli np. gazu elektronowego w metalu). Jeśli jest to gaz fermionowy, to poszczególne fermiony chcą obsadzać jak najniższe energetycznie stany kwantowe. Jeśli jednak jakiś elektron zajmie jakiś stan, to żaden inny fermion tego stanu nie może już zająć. Stanów o najniższej dostępnej energii zazwyczaj jest mniej niż samych fermionów, a wtedy kolejne fermiony nie mogą już zająć stanów najniższych energetycznie, ale muszą zajmować stany wyższe.

W przypadku bozonów zakaz Pauliego nie obowiązuje, a zatem schemat obsadzania stanów kwantowych jest zupełnie inny. Tam każdy bozon może zająć najniższy energetycznie stan niezależnie od tego, ile bozonów już w tym stanie się znajduje. To sprawia, że w niskich temperaturach całkowita energia gazu bozonów jest znacznie niższa niż całkowita energia tej samej liczby fermionów. W przypadku fermionów bowiem tylko ich nieznaczna liczba zajmuje stan o najniższej dostępnej energii. I choć może wydaje się, że całkowicie odeszliśmy od tematu nadprzewodnictwa, to właśnie ta obserwacja ma kluczowe znaczenie w teorii BCS.

PARY COOPERA

Wyobraźmy sobie przewodnik w temperaturze wyższej od temperatury krytycznej, przy której jego faza zmienia się w nadprzewodzącą. Gaz elektronowy znajduje się w całej dostępnej objętości przewodnika. Poszczególne elektrony są swobodne i niezależne od siebie, ale co jakiś czas tracą energię ze względu na zderzenia z drgającymi dość chaotycznie węzłami sieci krystalicznej.

Zaczynamy obniżać temperaturę próbki i zbliżamy się do temperatury krytycznej. Drgania sieci są coraz mniejsze, elektrony coraz swobodniej przemieszczają się w strukturze kryształu. Sytuacja trochę się teraz odwraca, bo to elektrony zaczynają mieć jakby więcej energii podczas zderzeń z węzłami sieci i po zderzeniu to węzeł raczej czuje, że został uderzony, a nie elektron. To dość dramatycznie zmienia sytuację. Powoduje bowiem, że uderzony jon zaczyna dość mocno drgać i poprzez bardzo silne wiązania sieci krystalicznej te drgania są przenoszone na inne

iony. Prędkość przenoszenia tego drgania jest bardzo duża w porównaniu z typowymi prędkościami elektronów w materiale. Gdzieś bardzo daleko od miejsca, w którym nastąpiło zderzenie, drgający na skutek pobudzenia sieci węzeł może akurat trafić w jakiś elektron i przekazać mu część energii, której nie mógłby mu przekazać, gdyby pierwszy elektron nie przekazał jej do węzła podczas zderzenia. Wygląda to tak,

jakby jeden elektron przekazał drugiemu, bardzo odległemu elektronowi, część swojej energii. Krótko mówiąc, jeśli temperatura jest odpowiednio niska, to włącza się kolejny sposób oddziaływania pomiędzy elektronami – mogą one wymieniać informację za pomocą drgań sieci krystalicznej. To sprawia, że przestają one być niezależne i ich zachowanie zaczyna być skorelowane.

Pełna analiza kwantowo-mechaniczna (na podstawie praw mechaniki kwantowej) pokazuje, że jeśli dwa elektrony w ten sposób ze sobą zaczną oddziaływać, to już żadne inne do tej komunikacji nie mogą się dołączyć, gdyż zabraniają tego prawa przyrody. Wygląda to tak, jakby dwa elektrony, które wcześniej były całkowicie niezależne i oddziaływały ze wszystkimi elektronami w ich otoczeniu, na skutek obniżenia temperatury zaczęły oddziaływać tylko parami i to na bardzo duże odległości za pomocą sieci krystalicznej.

Zaczynamy obniżać temperaturę próbki elektrony coraz swobodniej się przemieszczają



Jeden z moich Mistrzów mówił, że wygląda to jak zachowanie młodzieży przychodzącej do klubu na zabawę. Najpierw, zanim wejdą, wszyscy rozmawiają ze wszystkimi – najbardziej z tymi, obok których najbliższej się znajdują. Jak już wejdą i zaczyna grać muzyka, łączą się w pary, ale nie jak w dawnych czasach, przytulając się do siebie, ale tańcząc ze sobą na odległość. Jak chłopak podnosi rękę, to jego partnerka również. Jak on idzie do przodu, to ona również. Patrzą na siebie i korelują swoje zachowanie. Ale zupełnie nie patrzą przy tym już na innych tańczących. Nikt nie jest w stanie im przeszkodzić nawet



Pary patrzą na siebie i korelują swoje zachowanie

Jeśli ktoś między nich wejdzie, to oni nadal tańczą tylko ze sobą. No chyba, że jest zbyt dużo osób na parkiecie. Wtedy kontakt wzrokowy, jaki mają między sobą, może zostać przerwany – tak jak w wysokiej temperaturze duże drgania sieci krystalicznej przerywają skorelowane „rozmowy” elektronów.

Gdy materiał osiąga temperaturę krytyczną, drgania sieci stają się słabsze niż „rozmowy” elektronów wykorzystujące tę sieć. Swobodne elektrony przestają być niezależne i łączą się w pary, tzw. pary Coopera. Dzięki temu, że para Coopera składa się z dwóch, kwantowo skorelowanych na odległość elektronów, drgania sieci przestają zupełnie wpływać na ich zachowanie i przestają je rozpraszać. Elektrony (a raczej ich pary) zaczynają się przemieszczać zupełnie swobodnie, bez oporów. Metal przechodzi w fazę nadprzewodzącą.

STABILNOŚĆ FAZY NADPRZEWODZĄCEJ

Cała ta historia nie miałaby jednak żadnego znaczenia, gdyby nie dodatkowe konsekwencje, do jakich prowadzi pojawienie się par Coopera. Gdyby bowiem tylko powstawały pary Coopera i nic więcej jakościowo nie zmieniałoby się, to nawet najdrobniejsze zaburzenie mogłoby spowodować, że pary Coopera rozrywałyby się i nadprzewodnictwo natychmiast by zniknęło. Faza ta byłaby bowiem bardzo niestabilna ze względu na zewnętrzne zaburzenia.

Pojawienie się jednak par Coopera całkowicie zmienia istotę sprawy. Dwa elektrony, które są fermionami połączone (nawet na małą chwilę) w silnie skorelowaną parę, stają się jednym obiektem, który jest bozonem. Dokładnie w tym momencie, w którym to nastąpi przestaje obowiązywać zakaz Pauliego i rozpoczyna się kaskadowy proces przechodzenia bozonów do niższych energetycznie stanów kwantowych. Do tej pory bowiem stany te były dostępne jedynie dla pojedynczych cząstek. Teraz, gdy na skutek kwantowego korelowania przez sieć krystaliczną stały się bozonami, mogą przechodzić do stanów wcześniej niedostępnych. Ten proces rozpoczyna się natychmiast po tym, jak pojawią się skorelowane pary Coopera i sprawia, że wszystko całkowicie się zmienia.

Po pierwsze, w wyniku tego przechodzenia do niższych stanów energetycznych wyzwala się dość duża ilość energii, która pozwala choćby wypchnąć całe pole magnetyczne znajdujące się wewnątrz

i wykonać pracę – np. podnosząc magnes znajdujący się na próbce.

Po drugie (ważniejsze), każda para Coopera staje się tym sposobem bardzo silnie związana, gdyż energia każdej z nich jest teraz znacznie niższa od energii, jaką miały, gdy były dwoma niezależnymi fermionami.

Jeśli chcielibyśmy rozerwać taką parę Coopera, to musielibyśmy w jakiś sposób dostarczyć tyle energii, aby można było elektrony przenieść na stan dostępny dla fermionów. Nie mogą one przecież pozostać w stanie już zajęтым, bo muszą czynić zadość zakazowi



Pauliego. Rozerwanie korelacji w parze Coopera staje się zatem bardzo trudne i wymaga bardzo dużej energii. Faza nadprzewodnictwa staje się zatem w jednej chwili bardzo stabilna. Można ją przerwać tylko na dwa sposoby: albo dostarczając olbrzymiej energii z zewnątrz (np. przykładając bardzo duże pole elektryczne), albo podnosząc temperaturę powyżej temperatury krytycznej – wtedy zostaje przerwany kanał, którym komunikują się elektrony. Tak czy inaczej wymaga to dostarczenia sporej energii do układu.

Teoria BCS w rzeczywistości jest bardzo skomplikowana i wymaga sporej wiedzy matematycznej. Jest to bowiem teoria oparta na prawach mechaniki kwantowej i to zastosowanej do wszystkich elektronów równocześnie. Niektóre płynące z niej wnioski są na pierwszy rzut oka zupełnie absurdalne. Ale z całą przyjemnością powiem to kolejny raz – wszystkie przewidywania teorii BCS zostały potwierdzone doświadczalnie. Choć trzeba przyznać, że jest pewna klasa zjawisk związanych z nadprzewodnictwem, której w ramach teorii BCS nie udało się jeszcze wyjaśnić. Wierzmy jednak, że problem raczej tkwi w samej teorii BCS, a nie w fundamentach mechaniki kwantowej. ●